

INFLUENCIA DE DIFERENTES VARIABLES DEL ENSAYO DE TRACCIÓN EN LA DEFORMACIÓN DE ROTURA

D. A. Cendón, J. M. Atienza y M. Elices

Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren s/n,
28040 Madrid, España.
E-mail: dcendon@mater.upm.es

RESUMEN

Entender hasta qué punto la deformación de rotura es una propiedad del material resulta fundamental para estudiar cómo rompen los materiales y, especialmente, para poder realizar simulaciones representativas de los procesos que se están produciendo durante la rotura y establecer criterios que nos permitan predecirla. En este trabajo se ha estudiado la deformación de rotura obtenida en el ensayo de tracción de probetas planas de diferentes espesores. Para ello se ha realizado una campaña experimental de ensayos de tracción extensamente instrumentados sobre acero perlítico. Mediante un sistema de extensometría óptica se han obtenido los mapas de deformación en la superficie de las probetas durante todo el ensayo. Paralelamente, se han realizado simulaciones numéricas encaminadas a reproducir los ensayos con la mayor fidelidad posible. Se ha estudiado la influencia de la sección inicial y la base de medida del extensómetro en la deformación y la forma de rotura y en la dispersión de los resultados. Las simulaciones numéricas han permitido, además, caracterizar la triaxialidad de las diferentes probetas en el momento de rotura.

ABSTRACT

Strain localisation, necking and fracture phenomena during a tensile test are far from being completely understood. At present, advanced experimental techniques are available to allow measuring the strain localization phenomena during a tensile test. In this work, strain localisation and failure of steel specimens subjected to uniaxial tension is investigated. Rectangular specimens with different thicknesses of pearlitic steel were tested. Strain maps of the specimen surfaces during the whole tensile test were obtained using an optical extensometer. Detailed finite element simulations of the tests were conducted. The influence of different variables, like the area of the specimens, the length of the extensometer or the triaxiality, on the form of rupture and the strain at rupture have been discussed

KEY WORDS: uniaxial tensile test, ductile failure, failure criteria, stress triaxiality.

1. INTRODUCCION

El ensayo de tracción es la técnica experimental más utilizada para medir las propiedades mecánicas de los materiales metálicos [1]. Con él se obtienen los parámetros que definen el comportamiento del material, ya sea en rango elástico, plástico, e incluso en rotura. Uno de los parámetros básicos es la ductilidad, que está relacionada con la deformación que puede llegar a alcanzar el material previo a su rotura.

En un ensayo de tracción normalmente distinguimos entre la deformación bajo carga máxima y la deformación de rotura. La primera es fácil de medir y suele dar resultados bastante repetitivos. Sin embargo, la segunda es algo más complicada de obtener. La deformación de rotura se suele definir a partir del alargamiento medido justo antes de que se produzca una pérdida de carga apreciable producida por la fractura del material, lo cual es posible si se están utilizando extensómetros y la rotura se produce dentro de la

longitud captada por el extensómetro. El problema es que si la rotura sucede fuera de la longitud recogida por el extensómetro, la deformación de rotura calculada de esta forma no es representativa y puede experimentar grandes variaciones en función de la posición del punto de rotura con respecto al extensómetro.

Otras veces, los valores de la deformación de rotura se obtienen de forma manual juntando las dos partes de la probeta de tracción rota y midiendo la distancia final entre dos marcas que se hicieron al principio del ensayo. Tal y como se recoge en la Norma ASTM E8-96a (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) [2], estas dos formas para calcular la deformación en rotura no son generalmente intercambiables, recomendando como más precisa la primera.

La misma Norma advierte que los resultados de la deformación de rotura son muy sensibles a variables como: la velocidad del ensayo, la geometría de las

probetas, los extensómetros utilizados, los defectos geométricos de las probetas y la falta de alineamiento de la carga. En un test interlaboratorios realizado por la ASTM (Practice E691) se observó que de todas las propiedades que se obtienen en el ensayo de tracción, la de menor repetitividad y reproducibilidad era la deformación en rotura, seguida de cerca por la reducción en área. Esto ha llevado a que normalmente prefiramos utilizar la deformación bajo carga máxima como propiedad del material y dejemos la deformación de rotura como parámetro más bien marcado por la forma en que se ha realizado el ensayo.

No obstante, cuando se persigue conocer algo más sobre la ductilidad y la rotura del material la información que aporta la deformación bajo carga máxima no es suficiente. Entender hasta qué punto la deformación de rotura es una propiedad del material resulta fundamental para estudiar cómo rompen los materiales y, especialmente, para poder realizar simulaciones representativas de los procesos que se están produciendo durante la rotura y establecer criterios que nos permitan predecirla. En la actualidad, empezamos a disponer de herramientas ópticas experimentales capaces de medir la localización de las deformaciones y que pueden aportar una información decisiva en estos aspectos.

En este trabajo se presenta parte de una investigación enfocada a estudiar los mecanismos de rotura de los aceros de construcción. Se han estudiado los fenómenos de estricción y rotura en probetas planas de diferentes espesores. Para ello se ha realizado una campaña experimental de ensayos de tracción extensamente instrumentados sobre acero perlítico. Mediante un sistema de extensometría óptica se han obtenido los mapas de deformación en la superficie de las probetas durante todo el ensayo. Puesto que para caracterizar adecuadamente la rotura resulta fundamental conocer, no sólo las deformaciones, sino también el estado tensional en el instante de rotura [3-5], se han realizado simulaciones numéricas encaminadas a reproducir los ensayos con la mayor fidelidad posible.

Se ha estudiado la influencia de la sección inicial en la deformación y la forma de rotura y en la dispersión de los resultados. Las simulaciones numéricas han permitido, además, caracterizar la triaxialidad de las diferentes probetas en el momento de rotura.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

2.1. Material

El material estudiado en este trabajo es acero eutectoide empleado para la obtención de los alambres de pretensado. Se ha utilizado el alambre de partida (12mm diámetro) previo al proceso de trefilado en frío. El material fue suministrado en rollos por la fábrica EMESA-Trefilería (Arteixo-La Coruña).

La microestructura perlítica, obtenida gracias a un enfriamiento controlado desde la temperatura de austenización, está formada por finas láminas de ferrita y cementita. En el alambre, antes del proceso de trefilado, no se percibe una orientación preferencial de dichas láminas, lo que permite suponer que se trata de un material isótropo en sus propiedades mecánicas. Ensayos de dureza realizados sobre las diferentes direcciones [6] han confirmado esta hipótesis de isotropía.

2.2. Probetas

A partir del alambre de partida de 12mm de diámetro se obtuvieron probetas con una región de estudio plana de cuatro espesores diferentes (1, 2, 3 y 4 mm). La forma y dimensiones de las probetas se recogen en la Figura 1 y la Tabla 1. En total se obtuvieron 4 probetas para cada espesor.

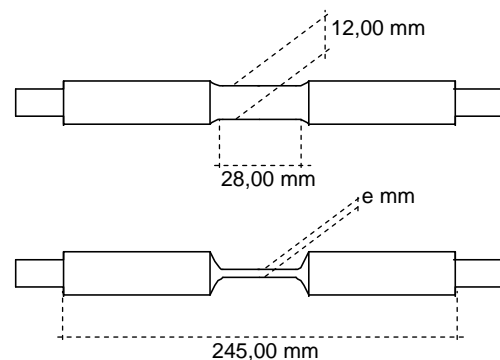


Figura 1. Probetas utilizadas para los ensayos de tracción.

Tabla 1. Sección transversal de las probetas

Nombre	e (mm)	área (mm ²)
E1	1.00	12.00
E2	2.00	24.00
E3	3.00	36.00
E4	4.00	48.00

2.3. Ensayos e instrumentación

Se realizaron ensayos de tracción sobre las 16 probetas. Se empleó una máquina universal estática marca Suzpecar con control en desplazamiento. La velocidad de sollicitación durante todo el ensayo fue 0.5 mm/s (velocidad de deformación aproximada de 2%/min). La carga se midió con una célula de carga HBM, modelo U2, de 10 TN de capacidad.

Para obtener la máxima información sobre el proceso de deformación, las probetas se instrumentaron de forma intensiva utilizando dos extensómetros resistivos gemelos, uno a cada lado de la probeta, abarcando toda la zona plana. De esta forma se aseguraba que la rotura de las probetas se produjera siempre dentro de la zona controlada por el extensómetro.

También se utilizó un sistema de medida de desplazamientos y deformaciones mediante óptica de alta resolución (Vic-2D) [7]. Este sistema mide el desplazamiento de un conjunto aleatorio de puntos que se marcan en la superficie de la probeta antes de empezar el ensayo. Después, mediante un software específico, interpola el campo de desplazamientos en toda la superficie utilizando funciones a trozos, tipo “splines”, obteniendo de esta manera un campo continuo que puede derivarse para obtener el campo de deformaciones. Mediante este sistema se obtuvo el contorno de deformaciones en la superficie de las probetas durante todo el proceso de carga y, en particular, en el instante de la rotura de las mismas (con una resolución temporal de 1 segundo).

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Para obtener información sobre la distribución de tensiones en la sección de las probetas durante los ensayos, se realizaron simulaciones numéricas en 3D de los cuatro espesores ensayados. Para ello se utilizó el programa ABAQUS 6.8, mallando la probeta completa. La malla se realizó utilizando elementos hexaédricos de 8 nodos, empleando un total de 28000 elementos y 34746 nodos. La Figura 3 muestra una imagen de una de las mallas utilizadas.

Con el fin de poder simular correctamente los cuellos de estricción, las simulaciones se realizaron en grandes desplazamientos. La carga se aplicó con control en desplazamientos, imponiendo un desplazamiento creciente en los nodos del extremo superior de la probeta, manteniendo inmovilizados los nodos del extremo inferior, emulando de esta manera el proceso experimental de aplicación de carga. La curva tensión-deformación utilizada se obtuvo a partir de los datos experimentales según se explica en trabajos anteriores [8]. En dicho trabajo se calibró el modelo numérico, mostrando que era capaz de reproducir adecuadamente el comportamiento posterior a la carga máxima.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Influencia del espesor y de la base de medida del extensómetro en las propiedades mecánicas.

Una de las principales ventajas del ensayo a tracción simple es que permite obtener parámetros como el módulo de elasticidad, el límite elástico o la resistencia máxima, de forma bastante sencilla. Estos parámetros pueden obtenerse con independencia de la sección de la probeta, ya sea ésta circular o rectangular [2]. Cabe hacerse la pregunta de si el mismo resultado será aplicable a la deformación en rotura.

Las Figuras 4a, 4b, 4c y 4d muestran, respectivamente, el límite elástico al 0,2%, la resistencia máxima, la deformación bajo carga máxima y la deformación de

rotura¹, todos ellos en función del espesor de las probetas. En dichas figuras se muestra el resultado en forma valor medio \pm la desviación típica. Puede apreciarse claramente cómo mientras los tres primeros resultados son independientes del espesor, la deformación de rotura es claramente dependiente, aumentando ésta a medida que lo hace el espesor.

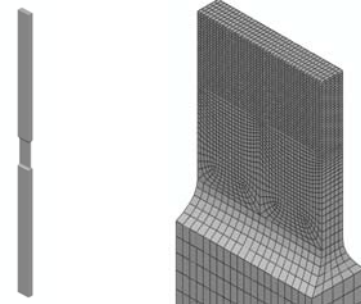


Figura 3. Geometría utilizada en las simulaciones (derecha) y detalle de la sección de la malla en la zona central de análisis (izquierda).

La norma ASTM señala que la deformación de rotura puede depender de la sección transversal de la probeta ensayada. Concretamente, señala que la deformación de rotura *generalmente aumenta en aquellas probetas en las que la relación $L_0/(A_0)^{1/2}$ disminuye*, siendo L_0 la longitud de la base extensométrica y A_0 el área inicial. Según esta indicación, valores mayores de la sección transversal, conducirían a valores mayores de la deformación de rotura. No obstante, al norma no llega a especificar hasta qué medida puede llegar a cambiar la deformación de rotura.

La norma ASTM señala también que, en caso de medir la deformación última de rotura, este dato debe ir acompañado por la longitud de la base de medida utilizada. De esta forma, la propia norma está asumiendo que los resultados pueden depender de la base extensométrica, sin llegar a especificar en qué medida pueden variar. Para estudiar este efecto, se han analizado los resultados de deformación bajo carga máxima y de deformación de rotura, utilizando una segunda base extensométrica más larga que la primera (28 mm en la segunda, por 24 mm en la primera). Los resultados de ambas bases extensométricas se muestran en la Figura 5. En ambos casos ambos extensómetros muestran la misma tendencia, obteniéndose menores deformaciones con el extensómetro de mayor base de medida, lo cual es lógico si pensamos que en el cuello de estricción se produce una localización de deformaciones en la cual se concentran los desplazamientos que después promediamos a lo largo de toda la longitud del extensómetro, si bien en el caso de la deformación bajo carga máxima, la diferencia apenas supera el 5%, mientras que en el caso de la deformación de rotura la diferencia alcanza el 20%.

¹ Solamente los ensayos válidos para medir deformación de rotura que, según ASTM E8, son aquellos en los que la rotura se produce en la mitad central de la zona adelgazada.

En este sentido, dado que la deformación de rotura depende claramente de la base extensométrica utilizada, parece más interesante obtener la deformación local de rotura, es decir, la deformación logarítmica en la zona de rotura como si se utilizase un extensómetro de base de medida idealmente nula. Este parámetro sería mucho más útil para incorporar un criterio de rotura en una simulación de Elementos Finitos. Obtener dicha deformación ha sido posible mediante la utilización del sistema de correlación digital de imágenes. La Figura 6 muestra la deformación local vertical de rotura frente al espesor de las probetas con rotura válida. Puede verse cómo la tendencia es similar a la de la Figura 4d.

El hecho de que la dispersión en la deformación de rotura de la Figura 6 aumente claramente con el espesor podría deberse al hecho de que la rotura está gobernada básicamente por la existencia de defectos en la sección de la probeta. Los mayores espesores, debido a la estado tensional, posibilitan deformaciones máximas mayores, pero también aumentan las probabilidades de defectos, lo cual haría que los resultados puedan ser más variables.

4.2. Influencia del espesor en la forma de la rotura.

Se he estudiado también la influencia del espesor en los mecanismos de rotura. En este sentido, en la literatura puede encontrarse cómo los resultados experimentales obtenidos por diversos autores muestran patrones de rotura distintos para los espesores más finos, en comparación con los demás espesores [9]. Ello ha llevado a algunos autores a suponer que para espesores finos la rotura está gobernada por un mecanismo de rotura distinto y, por tanto, el criterio de rotura que la explica, también debe ser distinto según se trate de espesores finos o gruesos [10].

Los resultados obtenidos en la campaña experimental que aquí se he realizado, en efecto, han mostrado un patrón de rotura distinto en las probetas de 1mm, en comparación con el resto de espesores (ver Figura 7). Mientras que en el espesor más fino se aprecian dos bandas diagonales de rotura (Figura 7a), para los espesores mayores las probetas muestran el típico patrón de rotura por copa y cono, con un plano de rotura perpendicular a la dirección de carga (Figura 7b).

Sin embargo, observando la Figura 4d, en la que se representan las deformaciones de rotura frente al espesor, vemos cómo ésta crece con el espesor de forma aparentemente bastante continua, no siendo apreciable ningún cambio de tendencia entre las probetas de 1, 2, 3 y 4 mm. De esta forma, aunque el espesor sí parece provocar un cambio brusco en la forma final de la superficie de rotura, aparentemente este cambio brusco no se aprecia en la deformación de rotura, que varía con el espesor de forma bastante suave. Este resultado no parece apoyar la hipótesis de utilizar criterios de rotura distintos en función del espesor.

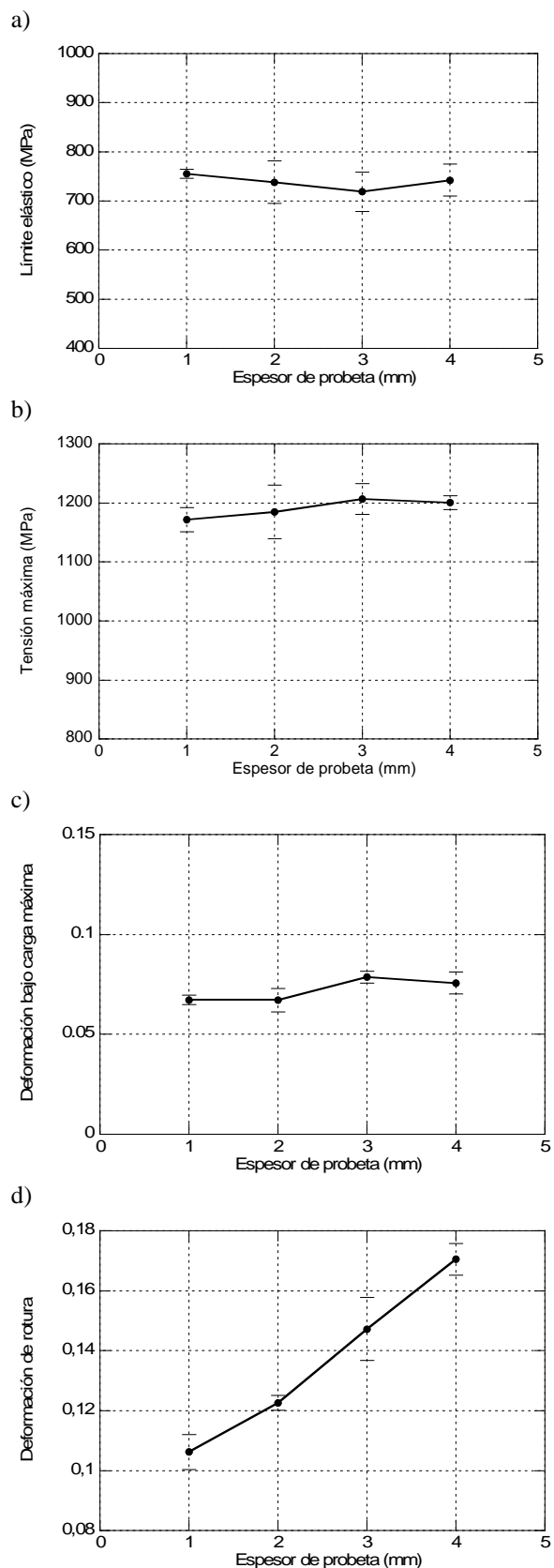


Figura 4. a) Límite elástico al 0,2% frente al espesor; b) tensión (ingenieril) máxima frente al espesor; c) deformación (logarítmica) bajo carga máxima frente al espesor; d) deformación (logarítmica) de rotura frente al espesor.

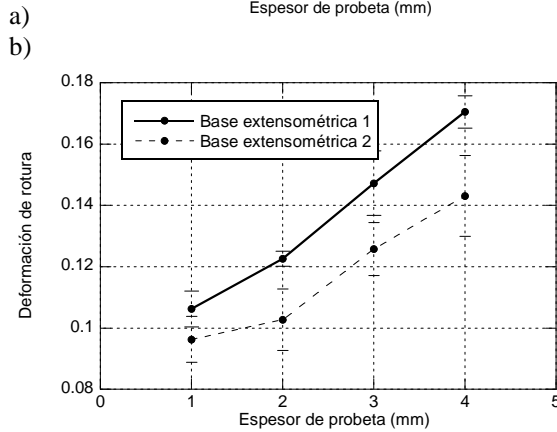
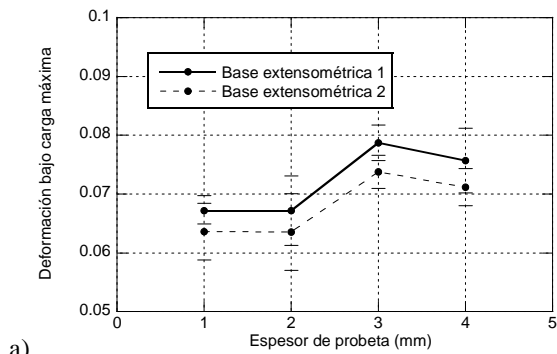


Figura 5. a) deformación (logarítmica) bajo carga máxima frente al espesor, obtenida con dos bases extensométricas distintas; b) análogamente, con la deformación de rotura.

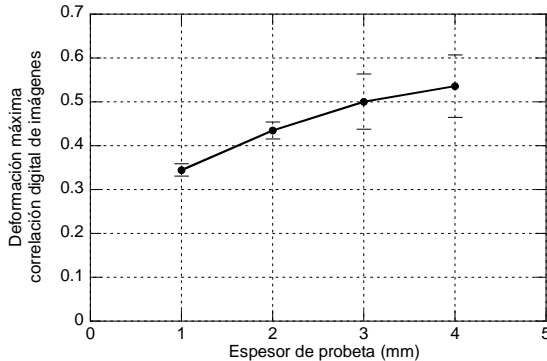


Figura 6. Deformación (logarítmica) de rotura local, frente al espesor.

Cabría pensar si tal vez la ausencia de un cambio brusco en la deformación de rotura en las probetas de 1 mm de espesor es una consecuencia del promediado en la deformación de rotura introducido por estar midiendo las deformaciones con un extensómetro cuya base de medida es muy superior a la longitud de la zona en la que se localiza la estricción y en la que, posteriormente, se produce la rotura. Sin embargo, los resultados mostrados en la Figura 6, que de nuevo muestran un cambio suave en las deformaciones de rotura medidas con un extensómetro ideal de base 0, desmienten esta hipótesis.

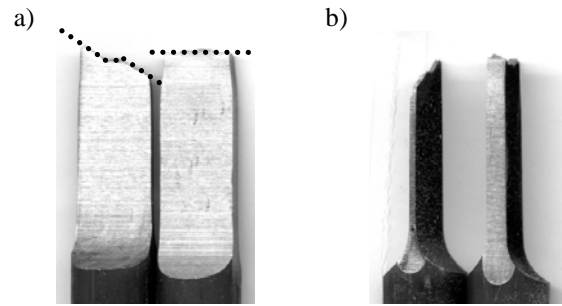


Figura 7. a) Vista frontal de la superficie de rotura de dos probetas, una de 1 mm y otra de 3 mm; b) análogamente, en vista lateral.

4.3. Influencia de la triaxialidad en la rotura.

Las simulaciones numéricas han permitido obtener información sobre el estado de deformaciones y tensiones del interior del alambre en los momentos próximos a la rotura. Esto resulta fundamental para tratar de entender qué parámetros son los responsables de desencadenar el proceso de rotura, lo cual es clave para ajustar los diferentes modelos de rotura

Un primer análisis que podría ser interesante es el de los contornos de deformación plástica equivalente en el momento de la rotura. En la Figura 7, pueden apreciarse los contornos de deformación plástica equivalente en el momento de la rotura, para los 4 espesores. La principal diferencia entre los espesores reside en que a medida que aumenta éste, las bandas diagonales de deformación se van achatando, de forma que la deformación se concentra en una zona cada vez más estrecha. Aún así, esta evolución parece gradual, especialmente entre las probetas de 1 y 2 mm, lo cual no explicaría el cambio importante que se produce en su forma de rotura.

Para intentar profundizar más en los motivos que originan la variación de la deformación de rotura con el espesor, se ha analizado el valor de la triaxialidad en los diferentes espesores durante el ensayo. Siguiendo a Bao y Wierzbicki [11], utilizaremos como índice de triaxialidad al cociente $\sigma_m / \bar{\sigma}$, siendo σ_m la presión (la tercera parte de la traza del tensor de tensiones), y $\bar{\sigma}$ la tensión equivalente de Von Mises. Este parámetro de triaxialidad es habitual en algunos criterios de rotura, como por ejemplo el de Johnson-Cook [3].

La Figura 8 muestra el citado índice de triaxialidad en función de la deformación extensométrica de la probeta hasta la rotura (con la misma base de medida empleada en la Figura 4d), en el punto de mayor triaxialidad, que corresponde al punto central de la sección de estricción. Puede apreciarse cómo la triaxialidad aumenta de forma más rápida en los espesores más finos, si bien, una vez más, no se aprecia una diferencia drástica entre la probeta de 1 mm y las probetas de mayores espesores. Observando el valor de la triaxialidad en el instante de la rotura, se observa cómo la tendencia es a que la rotura

se produzca más o menos cuando las probetas alcanzan el mismo valor de la triaxialidad. A la vista de los resultados, en esta campaña experimental, la triaxialidad aparentemente no puede explicar las diferencias entre las deformaciones últimas de rotura para los distintos espesores.

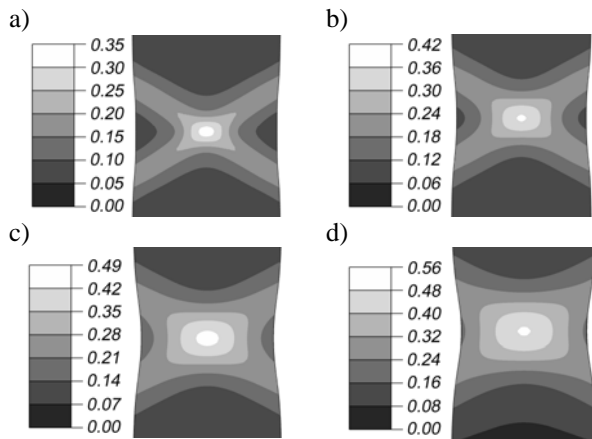


Figura 8. Contornos de deformación plástica equivalente para los espesores: a) 1mm; b) 2mm; c) 3mm; d) 4 mm.

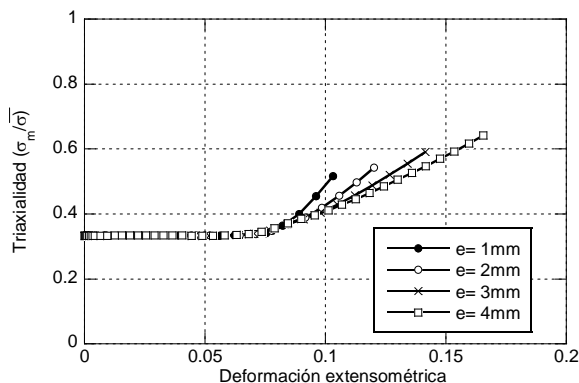


Figura 9. Índice de triaxialidad hasta la rotura, obtenido con las simulaciones numéricas para los distintos espesores.

5. CONCLUSIONES

Con una campaña experimental extensamente instrumentada sobre probetas planas de diferentes espesores se han puesto de manifiesto los diferentes factores que afectan al parámetro deformación de rotura obtenido en un ensayo de tracción. También se ha mostrado que aunque en el rango de espesores estudiados se observa un importante cambio en la forma de rotura, esto no se ha visto reflejado en un cambio brusco de la deformación de rotura.

Los resultados obtenidos muestran que no es posible considerar la deformación de rotura como un parámetro del material, al menos no en el mismo sentido en que se consideran otros parámetros como el módulo de elasticidad o el límite elástico, pero sin duda

proporciona una información muy valiosa. Entender cómo se localiza la deformación durante el ensayo de tracción y cómo se produce la rotura resulta fundamental para interpretar los resultados experimentales y por ende las propiedades mecánicas que se pueden extraer de ellos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo del Ministerio de Ciencia y Tecnología a través del proyecto CONSOLIDER-INGENIO 2010. También desean mostrar su gratitud a D. Luis del Pozo y D^a. Luisa Villares de EMESA Trefilerías, por su ayuda con el material y al profesor Jaime Planas por sus útiles comentarios.

REFERENCIAS

- [1] Sánchez-Gálvez, V., Física de la Plasticidad, ETSI Caminos, Canales y Puertos, 1988.
- [2] ASTM Annual Book of ASTM Standards.
- [3] Johnson, G. and Cook, W.H., Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Eng. Frac. Mech. Vol. 21. pag. 31-48, 1985.
- [4] Bao, Y. and Wierzbicki, T., On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space, Int. J. Mech. Sciences Vol. 46. pag. 81-98, 2004.
- [5] Bao, Y., Dependence of ductile crack formation in tensile tests on stress triaxiality, stress and strain ratios, Eng. Frac. Mech. Vol. 72. pag. 505-522, 2005.
- [6] Atienza, J.M., Tensiones residuales en alambres de acero trefilados, Tesis Doctoral, 293 pag., Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- [7] Vic 3D/2D User Manual. Correlated Solutions Inc. 2005.
- [8] Cendón, D.A., Atienza, J.M y Elices, M. Localización de la deformación durante un ensayo a tracción: resultados experimentales y numéricos. Anales de la Mecánica de la Fractura, Vol. 26 (1). Pp. 154-159. 2009.
- [9] Wierzbicki, T. and Bao, Y. Calibration and evaluation of seven fracture models. Int. J. of Mech. Sci., Volume 47, Issues 4-5. Pp. 719-743. 2005.
- [10] Kamoulakos A, Culiere P, Araki T. Prediction of ductile metal rupture with the E-W Model in PAM-CRASH. In: IBEC 2003 Chiba, Japan; 2003.
- [11] Y. Bao & T. Wierzbicki. A comparative study of various ductile crack formation criteria. Journal of Eng. Mats. and Tech., Vol. 126. Pp. 314-324. 2004.